

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## PROBLEMÁTICA Y ACTUACIONES RECIENTES EN LA PRESA DE MEQUINENZA

J. M. Buil<sup>1</sup>, F. Río<sup>1</sup>,  
A. Campos<sup>2</sup>, A. Aguado<sup>2</sup>, C. M<sup>a</sup>. López<sup>2</sup> y S. Chinchón<sup>3</sup>

*RESUMEN: La presa de Mequinenza dispone, desde sus primeras etapas en los años 60, de importantes medidas de auscultación que permitieron detectar en las primeras épocas un comportamiento anómalo del bloque 13-14, diagnosticado inicialmente como un hinchamiento de la masa del hormigón del citado bloque. Recientemente, dentro de los trabajos usuales desarrollados entre la UPC y ENDESA en el estudio de presas con expansiones, se ha reformulado el diagnóstico basado tanto, en estudios microscópicos sobre testigos de la propia presa, como numéricos, basada en el MEF en 2D haciéndose una nueva propuesta que explica de forma más consistente los movimientos producidos, y que en menor medida aún se producen.*

*El objeto de esta comunicación es presentar los resultados del análisis realizado, en los cuales se puede ver los movimientos que se producen a medida que progresan las fisuras en dicho bloque, tanto en profundidad de la presa (longitud), como en anchura (apertura de fisura). Por otro lado, los estudios experimentales muestran la aparición de taumasita en algunas de las muestras obtenidas de hormigón de revestimiento, especialmente en galerías existentes en el terreno (cotas 22 m y 81 m). Con todos estos resultados se analiza la situación y se proponen medidas de actuación cara a futuro, para los técnicos que gestionan esta presa u otras con similares problemáticas.*

---

<sup>1</sup> Endesa Generación S.A.

<sup>2</sup> ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña

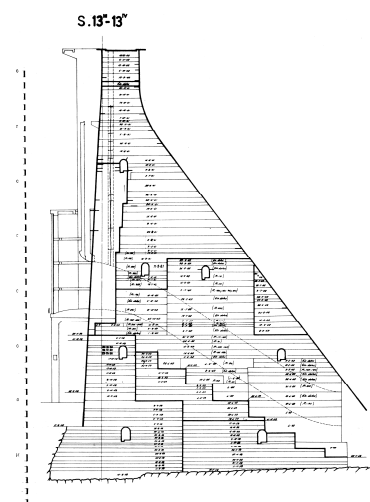
<sup>3</sup> Universidad de Alicante. Equipo conjunto con UPC en expansión de presas de hormigón con expansiones

## 1.- INTRODUCCIÓN

La presa de Mequinenza se integra en el aprovechamiento hidroeléctrico integral de un tramo del río Ebro gestionado por ENHER en 1955. La altura máxima de la presa es de 79 m con una longitud de coronación de 461 m, situándose la cota de cimentación a 45m, con un volumen del cuerpo de presa de  $1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ . En la figura 1 se presenta una vista de la misma desde zona de aguas abajo. El perfil de la cerrada es abierto (tipo U), con una altura de cota muy similar en la mayoría de los bloques, esto es, la rigidez de los mismos es similar, incluso algo menor, consecuencia de su menor altura, en el gran bloque donde se sitúan las tomas (junta 13 y 14) de una longitud de 70 metros. La longitud del resto de los bloques se sitúa entre 14 y 21 metros, excepto el bloque entre las juntas 21 y 22 que es de 8,16m. En la figura 2 se presenta una sección transversal del citado bloque por la zona denominada entre juntas 13<sup>3</sup> y 13<sup>4</sup>, observándose las secuencias de hormigonado y las juntas internas y escalonadas existentes. Con ella se quiere mostrar, principalmente la singularidad del citado bloque, por el que atraviesan las tuberías que van a las turbinas.



*Figura 1.- Vista de la presa desde aguas abajo*



*Figura 2.- Sección transversal entre juntas 13<sup>3</sup> y 13<sup>4</sup>*

Tal como se comenta en (Buil et al, 2008), dicha presa se embalsó por primera vez en diciembre de 1965, si bien con posterioridad se bajó de cota para volverse a llenar en 1969. En ese período se hicieron toda una serie de trabajos complementarios para dar respuesta a una creciente demanda de seguridad fruto de la rotura de la presa de Vega de Tera (España) en el año 1957, Malpasset (Francia) en 1959 y Vaiont (Italia) en 1963. Entre los trabajos de ese período (1964-69) se encuentran una ampliación de la pantalla de impermeabilización y drenaje, consolidación de las laderas, prolongación de las galerías de inspección y drenaje, construcción de una nueva galería profunda de drenaje a 25 metros por debajo de la cimentación de la presa (Díez-Cascón y Bueno Hernández, 2001), un rastrillo de refuerzo de la presa

(Álvarez y Baztán, 1967) en dos proyectos, tanto en el aliviadero y desagües de aligeramiento como en la zona de central, ante las dudas que surgieron *sobre el comportamiento de la cimentación, formada por estratos horizontales de caliza separados por delgadas láminas de lignito* y, una ampliación del sistema de auscultación, lo que dio lugar, probablemente, a la presa más instrumentada de España en su momento.

Al comenzar el llenado del embalse durante los primeros años, pudo observarse unos movimientos hacia aguas abajo de las alineaciones, más acentuados en el bloque situado entre las juntas 13 y 14. En la figura 3 se presentan los movimientos de las alineaciones en coronación de las bases situadas en los distintos bloques, correspondientes a cuatro edades diferentes: 1974, 1984, 1994 y 2004.

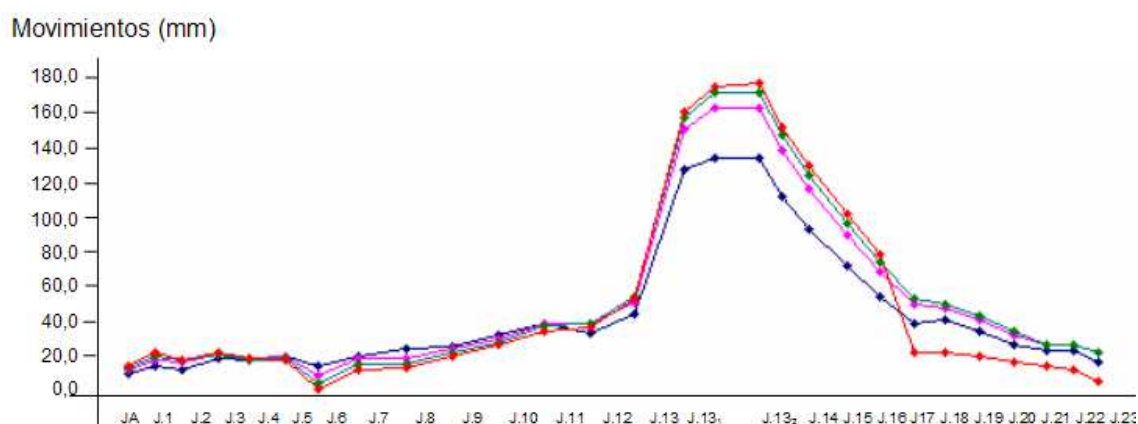


Figura 3.- Movimientos alineaciones en los distintos bloques para cuatro edades diferentes

El comportamiento inusual del bloque 13-14 ha sido objeto de numerosos estudios previos experimentales (Fernández Cánovas, 1980) y numéricos (Oliver *et al.*, 1985), (Cervera *et al.*, 1990), enfatizando principalmente en el entumecimiento como razón de ser de dicho comportamiento, lo cual ha sido puesto en entredicho como causa principal, en los estudios recientemente realizados (Buil *et al.*, 2008) y (Buil *et al.*, 2009). Estos últimos estudios señalan, que todos los bloques, tal como se refleja en la citada figura 3, pueden tener un entumecimiento del hormigón o bien un hinchamiento del terreno, especialmente hasta la zona de drenes, siendo esta la causa más probable; mientras que en el bloque 13-14 se produjo, en gran medida una degradación evolutiva de las juntas de hormigonado, junto con subpresiones. Las actuaciones realizadas en los años 70, de sellar juntas y reperforar drenes, así como hacer nuevos, dieron buenos resultados, tal como asimismo se aprecia en la citada figura. En los bloques adyacentes al bloque 13-14 se observa un efecto de arrastre.

## 2.- OBJETIVO

En este marco general de estudio, la presente comunicación tiene por objetivo presentar los resultados de los trabajos experimentales realizados en

los últimos meses cara a ahondar en el diagnóstico y, por otro lado, en la modelización numérica de una sección transversal del bloque 13-14.

### 3.- ESTUDIOS EXPERIMENTALES

En los últimos años, se ha visitado dos veces la presa, el día 3 de octubre de 2006 con el objetivo de definir la campaña de extracción de testigos y, posteriormente, el día 3 de noviembre de 2009, con el objetivo de definir una campaña específica de toma de muestras, así como contrastar in situ ciertas medidas. Este día se visitó, aparte de la presa, las galerías existentes en el terreno, principalmente la existente en la cota 22 m y la auxiliar, continuación de la existente en la presa, de la cota 81 m.

#### 3.1- RESULTADOS MUESTRAS DE GALERÍAS

En los muros de hormigón que existen en la galería de la cota 22 m se han hecho catas según el eje del río, tal como puede verse en la figura 4, en la que se observa (Figura 4a) que la degradación del hormigón es más sensible en las zonas de bordes y en contacto con agua. De hecho se pueden obtener partes de ese hormigón con la mano, como síntoma de una significativa desagregación, si bien se trata de un muro de revestimiento del terreno, sin responsabilidad estructural alguna. En la figura 4b se muestra la parte inferior de una cata y la canaleta donde circula el agua, con las mismas observaciones anteriores, pudiéndose ver un cierto depósito blanco en el agua.



*Figura 4.- Cata en muro del hormigón de la galería a cota 22 m: a). Vista frontal y b). Inferior y canaleta*

Estas muestras fueron trasladadas a la Universidad de Alicante y ensayadas y analizadas por el equipo del profesor Servando Chinchón (UPC, 2010). Las técnicas empleadas fueron: difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). En la figura 5a se observan cristales

de etringita y thaumasita; mientras que en la figura 5b se muestra el crecimiento de cristales de etringita y thaumasita por toda la superficie, observándose también un crecimiento esférico así como la aparición de una fisura en la pasta. En general, numerosas de las muestra tomadas en los hormigones en contacto con agua y terreno, confirman la presencia de yeso, etringita y thaumasita, todos ellos productos de una degradación por ataque sulfático.

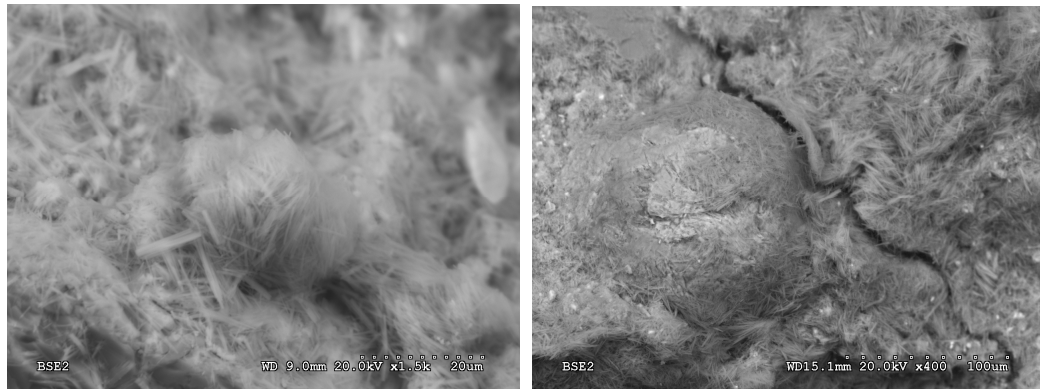


Figura 5.- Fotografías con MEB donde se observan cristales de etringita y thaumasita

### 3.2- RESULTADOS DE TESTIGOS DE LA PRESA

Para determinar las características expansivas del hormigón, se hizo una campaña de extracción de testigos en los puntos señalados en la figura 6, en la que puede verse una amplia representación de hormigones dispuestos en la misma.

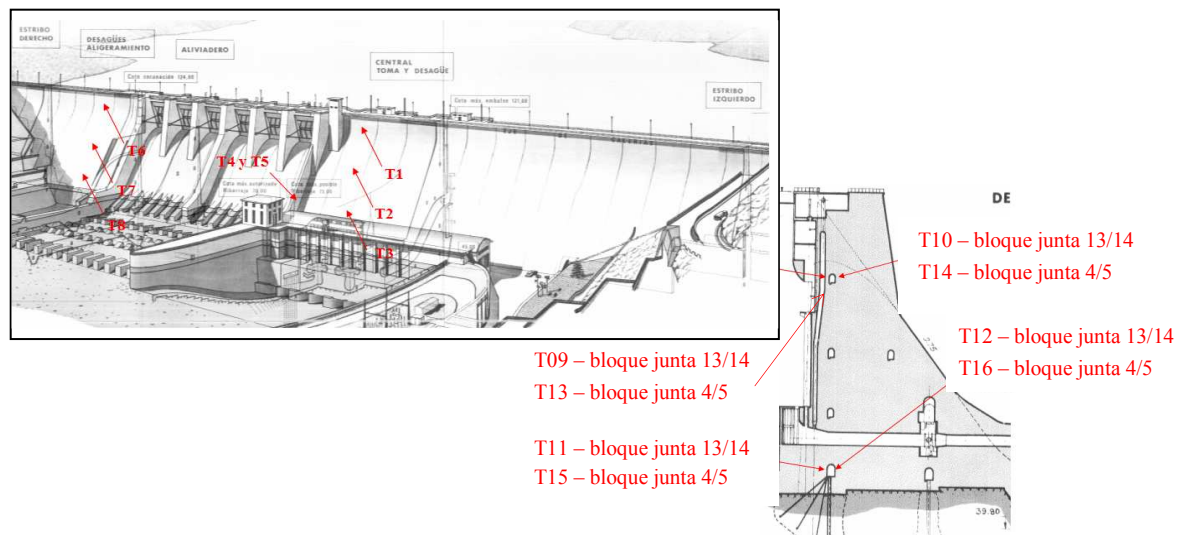


Figura 6.- Ubicación de los testigos en paramento y galerías

Los resultados obtenidos, recogidos en UPC (2008), muestran de una manera general, un hormigón de buenas características, homogéneo y sin especiales características reseñables visualmente, aparte de lo usual al



tratarse de un hormigón de Presa, tal como se muestra en la figura 7, en cuyo testigo, debido a la forma redondeada de los áridos empleados la adherencia a la pasta es débil siendo posible la separación entre ellos con una relativa facilidad. Asimismo puede verse que los áridos son de una gran diversidad mineralógica con una predominancia de rocas calizas.



*Figura 7.- Testigo del muro del aliviadero del bloque 12-13 en zona no fisurada*

Por otro lado, la fisuración enramada observada en el muro del aliviadero (Figura 8) es debido al desarrollo de reacciones internas expansivas del tipo reacción álcali-árido. Este tipo de reacción también se ha detectado en el testigo 09 extraído de la galería superior del bloque 13-14 en dirección aguas arriba aunque en una pequeña cantidad (Figura 9). Ahora bien, aunque se han detectado indicios de RAA en dos taladros analizados, dicho fenómeno parece estar localizado dado que en los demás testigos no se encuentran señales de este tipo de reacciones. En cualquier caso no es el fenómeno principal y no explica los comportamientos en primeras etapas antes mostrados y, tampoco justificarían los movimientos medidos en coronación de presa, tanto en alineaciones como en nivelaciones.

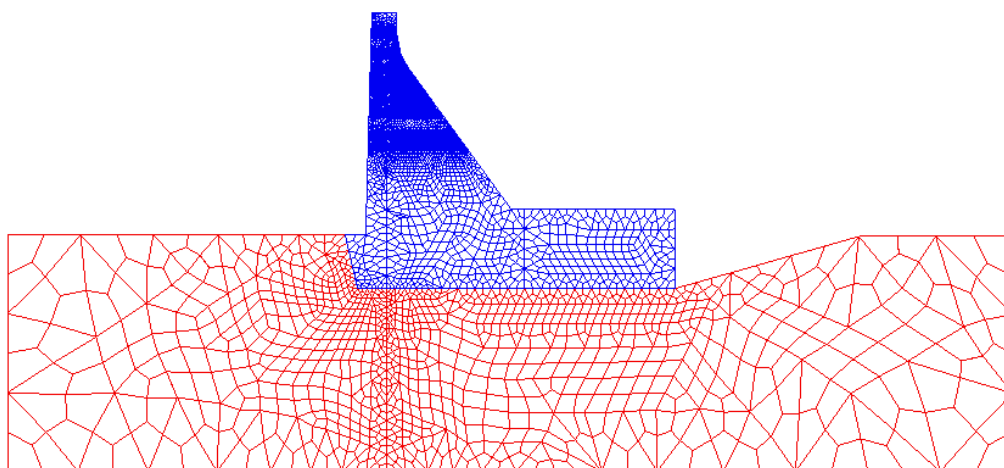


*Figura 9.- Aureola en árido de testigo 9*

*Figura 8.- Fisuración enramada en muro lateral de aliviadero. Bloque 12-13*

## 4.- ESTUDIOS NUMÉRICOS

En la Figura 10 se muestra la malla de elementos finitos utilizada para los cálculos del bloque 13-14, en la cual se ha dispuesto una mayor densificación en la zona superior y la inclusión de juntas horizontales ubicadas donde se han observado fisuras en la estructura real (se pueden apreciar en figuras posteriores).



*Figura 10. - Malla de elementos finitos del bloque 13-14 (hormigón en color azul y terreno en rojo)*

Se ha analizado la incidencia de un proceso expansivo, como los debidos al entumecimiento, actuando en la zona de hormigón cercana a paramento aguas arriba y a la izquierda de la línea de drenes (figura 11 izquierda). Además de la acción del peso propio y el empuje hidrostático, también se ha incluido la acción de la subpresión en las juntas. Se ha considerado un comportamiento constitutivo no lineal de los elementos junta (Carol et al., 1997; López, 1999), que posibilita la formación y aperturas de fisuras en las juntas de construcción que se han representado explícitamente en la modelización.

Se presentan resultados numéricos correspondientes a dos casos diferentes, ambos con un valor de deformación impuesta de 0,35 mm/m. Por un lado, se ha adoptado un valor bajo de resistencia a tracción de las juntas de 0,5 MPa, fundamentado en la hipótesis de la singularidad del bloque 13-14, en que debido a tensiones internas causadas por efectos térmicos y de retracción (se trata de un bloque de mayor tamaño que los demás y en el que probablemente el hormigón tiene un mayor contenido de cemento), las habituales juntas de hormigonado de una presa, en el caso de este bloque presumiblemente han resultado ser bastante débiles. Por otro lado, en el segundo de los casos, se ha considerado unas condiciones de mayor resistencia en las juntas de construcción, que se ha adoptado de 3 MPa, tal como cabe esperar en otros bloques vecinos al 13-14, que presentan una longitud considerablemente menor aunque una similar sección transversal.

A fin de tener en cuenta un proceso más realista del entumecimiento, las deformaciones impuestas se han aplicado suponiendo una evolución que se inicia en paramento aguas arriba y progresa hasta llegar a la línea de drenes (Ver figura 11a). La acción de la subpresión se ha ido incluyendo en el cálculo a medida que se produce la fisuración en cada junta; a partir de que se alcanza la resistencia máxima y comienza la degradación y apertura de una junta, empieza a actuar la subpresión, incluida en el cálculo mediante cargas distribuidas de compresión aplicadas sobre los elementos de medio continuo ubicados a uno y otro lado de la junta que se ha abierto.

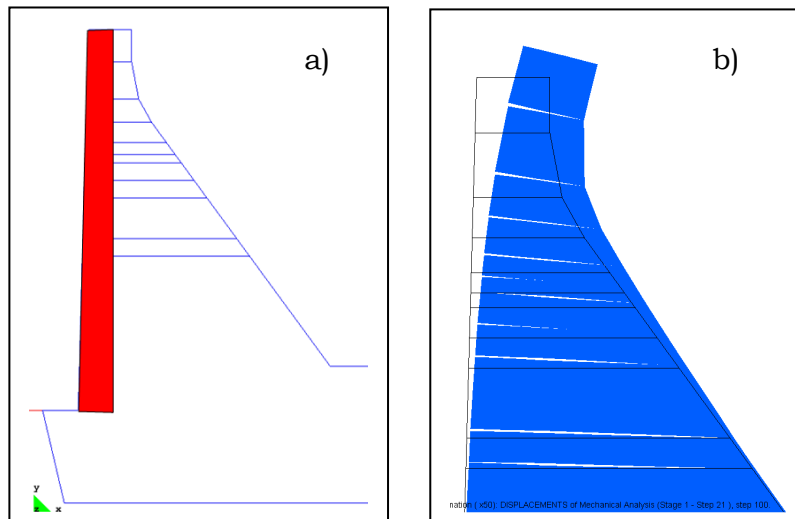


Figura 11. - Zona –en rojo- en que se han aplicado las deformaciones impuestas (izquierda) y configuración deformada final de zona superior (derecha) (x50)

En la figura 11b se muestra la configuración deformada final para el caso con resistencia de 0,5 MPa, en la que se puede apreciar la generación y propagación de la fisuración en las juntas de construcción, que llega a alcanzar longitudes de penetración considerables. Se ha obtenido un movimiento en coronación de 9,5 cm en horizontal y de 4,1 cm en elevación.

La máxima apertura de fisura obtenida en este cálculo ha sido de 0,7 cm, registrada en la junta superior. Si bien se requiere aún algún grado de ajuste respecto a lo detectado en obra, tanto en la magnitud de los movimientos como en la apertura de juntas, los resultados obtenidos hasta el momento son muy promisorios.

Por otro lado, cabe señalar que aunque no se ha completado el cálculo del caso con resistencia de 3 MPa, el cual se encuentra, actualmente, en aproximadamente un 80% de su desarrollo, los resultados alcanzados hasta el momento resultan ilustrativos.

En figura 12 se presenta el estado de fisuración de ambos casos en un mismo momento del proceso, en términos de la energía disipada en fractura, representada por el espesor de línea en cada punto de las juntas, en color rojo si la fisura está activa y en azul si se encuentra en descarga elástica. Se puede apreciar en la figura que la simulación de un aumento de resistencia en las



juntas de construcción, tiene como consecuencia una reducción considerable de la fisuración. Como consecuencia de esto, se ha obtenido una significativa reducción de los desplazamientos en coronación.

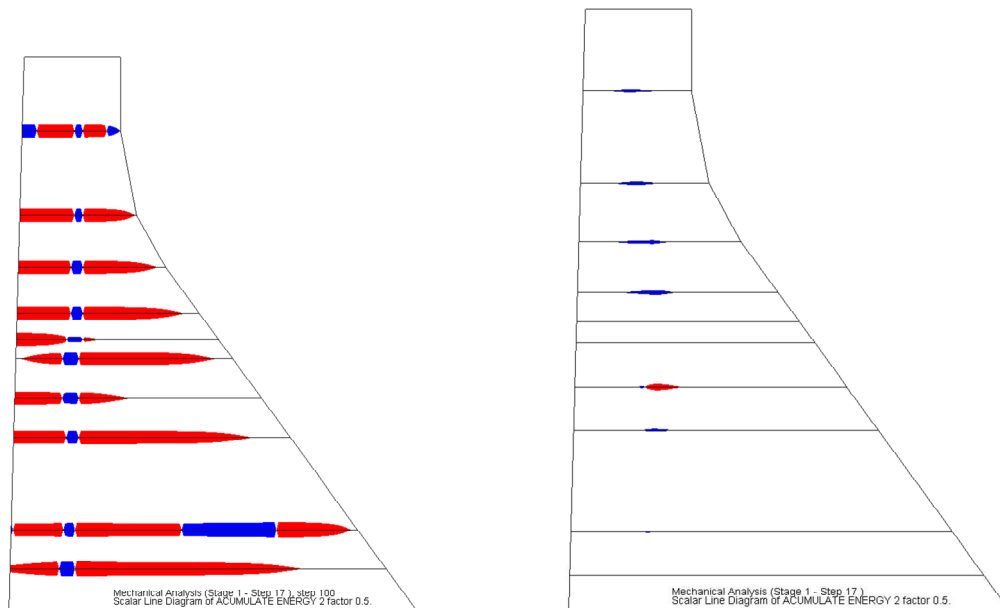


Figura 12. - Comparación de la fisuración en términos de la energía disipada en los casos con resistencia de 0,5 MPa (izquierda) y 3,0 MPa (derecha)

## 5.- CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que no existe una expansión del hormigón de la presa como causa principal de los movimientos detectados en la misma. En dos testigos de 19, esto es una muestra minoritaria, se ha observado una reacción álcali árido, que explican algunas de las fisuras enramadas en algún punto del paramento de aguas abajo. En los muros de revestimientos de galerías, esto es, sin responsabilidad en la presa, se ha detectado taumasita y la etringita secundaria, que son productos expansivos, que inciden en la degradación de los mismos, especialmente en la parte en contacto con agua.

Los resultados numéricos obtenidos hasta el momento, si bien preliminares y, aún por completar, permiten explicar de forma más consistente el comportamiento diferenciado detectado en la presa de Mequinenza, sin tener que recurrir a unas expansiones distintas entre los bloques, y sobre todo sin necesidad de dar una magnitud excesiva de entumecimiento en el bloque 13-14, a fines de ajustar los movimientos medidos en la presa.

De los trabajos realizados cabe señalar que el hinchamiento, hipótesis inicial, no es la causa principal de los movimientos observados en la presa en primeras edades de la misma.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

Con estas líneas se agradece la colaboración de Endesa Generación S.A. en el desarrollo del estudio, conjunto con la UPC, de presas de hormigón con expansiones a lo largo de más de dos décadas. Asimismo se agradece a los compañeros de la UPC que han intervenido a lo largo de estos años en dichos estudios.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, A.; Baztan, J. A (1967) "Cimentación de presas en terrenos de posible inestabilidad". Revista de Obras Públicas. Número extraordinario, 1967, pp. 649-660.

Buil, J. M., Río, F., Aguado, A., Agulló, L., Araujo, G. y López, C. M. (2008) "Revisión del diagnóstico de la presa de Mequinenza". VIII Jornadas Españolas de Presas. CNEGP. 26-28 Noviembre 2008, Córdoba, España

Buil, J. M., Río, F., Aguado, A., Agulló, L., Araujo, G., López, C. M. y Agulló, L (2009). "Mequinenza dam: revision of an earlier diagnosis". XXIII Congrès des Grands Barrages. Brasilia. ICOLD. Quest. 91-R52. 25 a 29 Mayo 2009. ISSN 0254-0703

Carol, I., Prat, P. C., and López, C. M. (1997). "Normal/Shear Cracking Model: Application to Discrete Crack Analysis". Journal of Engineering Mechanics. Vol. 123, 765-773.

Cervera, M.; Olivier. J. Galindo, M. (1990) "Simulación numérica de patologías en presas de hormigón". Monografía CIMNE, Barcelona, 1991, 169 p.

Díez-Cascón, J. y Bueno Hernández, F. (2001) "Ingeniería de presas de fábrica". Ediciones Universidad de Cantabria, 2001, 932 pag.

Fernández Cánovas, M. (1980) "Entumecimiento higrométrico del hormigón". Materiales de Construcción. IETcc. N° 383. pp.: 27-41.

López, C. M. (1999). "Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones". 237 p. Barcelona: Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya.

Oliver, J.; Oñate, E.; Bugeda, G.; Feliu, T.; Herrero, E. (1985) "Un modelo numérico para análisis de la seguridad en presas de gravedad bajo cargas internas". Primeras Jornadas Españolas de Presas. Madrid, 1985.

UPC (2008). "Caracterización del hormigón de la presa de Mequinenza". Anejo 2 del Informe final del comportamiento de las presas de Mequinenza, Rumedo, Graus, Tavàscan y Torán. UPC CTT C6275 y 6276. 17 de enero de 2008

UPC (2010). "Informe de seguimiento del comportamiento de las presas de Mequinenza, Rumedo, Graus, Tavàscan y Torán". UPC CTT C7232. 10 de marzo de 2010. Informe 2009 IS 02